

許容応力度設計法で設計された RC 床版橋の構造信頼性に対する一考察

株式会社 オオバ 正会員 ○ 元木 茂彰
広島工業大学工学部 フェロー会員 中山 隆弘

1. はじめに

わが国では、港湾施設・構造物の設計基準¹⁾については、すでに信頼性設計法が導入されているにも関わらず、橋梁の設計示方書については、いまだその時期は明らかではないように思われる。

一方、欧米では、例えば BS5400²⁾のように、30年以上も前に、橋梁についてもすでに許容破壊確率の概念が導入されている。さらに BRIME(2001年)³⁾のように、橋梁の信頼度を念頭においた橋梁の維持管理のためのレポートもある。

わが国においても、例えば前田ら⁴⁾は、25年も前に既に許容応力度設計法で設計された合成桁橋の上部工の信頼性を信頼性指標で評価し、その結果に基づいて適切な荷重係数について提案している。また、宮本ら⁵⁾は同じく許容応力度設計法で設計された RC-T 桁橋の信頼性を求めるための貴重な研究を行っている。ただし、筆者が知る限り、その後は長きに亘る空白期間があったようで、宮本らの研究から約20年も経った後に、同じく RC-T 桁橋を対象モデルとして森川ら^{6),7)}が精力的な研究成果を発表している。鋼橋の信頼性についてはほぼ同時期に村越ら⁸⁾が論文を発表している。

このような状況に鑑み、本研究では、構造物の信頼性は単に供用開始時のみでなく供用中も一貫して信頼性指標や破壊確率によって評価することが望ましいという立場に立って RC 橋の信頼性を構造信頼性理論によって評価することを目的とした。その際、限界状態としては終局限界状態を想定している。

対象としては構造的にシンプルな小規模な RC 床版橋を選び、塩害による経年劣化を想定して研究を進めた。周知の通り、RC 構造物の劣化は、その他、コンクリートの中性化やアルカリ骨材反応に起因するもの、疲労による亀裂の進展に起因するものがあるが、この中では、特に沿岸部に近い橋梁の場合は塩害に起因する劣化が多い。なお、信頼性の評価は一次ガウス近似法⁹⁾を用いて行った。

2. 解析モデル

解析モデルは、わが国の旧道路橋示方書に依る許容応力度設計法 (TL-14) で設計された橋長 5.100m、総幅員 4.200m の小規模な RC 床版橋¹⁰⁾で、死荷重や輪荷重による曲げモーメントの計算はオルゼンの図表を用いた簡易的手法で行われている。

因みに、床版の有効高さは 240mm、幅員方向の幅 1m 当たりの鉄筋量は 3097mm²である。また、コンクリー

トの設計基準強度は 24.0N/mm²、鉄筋の降伏点の公称値は 295N/mm²である。その他の力学的諸量については紙面の都合上、省略する。なお、今回、不確実性を考慮した設計因子は、活荷重¹¹⁾、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏点の3因子のみで、それらの確率特性は表-1の通りである。

表-1 設計因子の確率特性

	平均値	標準偏差	分布形
コンクリートの圧縮強度: X(1)	35.77N/mm ²	7.15N/mm ²	正規分布
鉄筋の降伏	284.85N/mm ²	28.49N/mm ²	正規分布
活荷重: X(3)	74.6kN	43.1kN	対数正規分布

3. 解析ケース及び信頼性指標の算定法

3.1 解析ケース

今回は、塩害による腐食のために鉄筋量が減少し、終局限界状態に対する信頼性が減少することを想定し、表-2に示す9ケースに対する解析を行った。

表-2 解析ケース

	かぶり(mm)	腐食環境
case1	40	飛沫帯
case2	40	汀線付近
case3	40	0.5km
case4	50	飛沫帯
case5	50	汀線付近
case6	50	0.5km
case7	60	飛沫帯
case8	60	汀線付近
case9	60	0.5km

なお、鉄筋の腐食の影響は、ここでは単に鉄筋の断面が減少するものとして検討している。また、設計供用期間については100年、鉄筋の腐食限界イオン濃度については1.2kg/m³¹²⁾とし、Fickの拡散方程式によって鉄筋の位置における任意の時点の塩化物イオン濃度を計算した。鉄筋の腐食率は表-3の通りである。

表-3 腐食率

海岸からの距離	腐食速度(%/年)	
	進展期	加速期
飛沫帯	0.05	0.8
汀線付近		0.7
0.5km		0.4

3.2 信頼性指標の算定法

前述のように、信頼性解析は一次ガウス近似法によって行った。このとき、3.2に示す性能関数に含まれる確率変数については表-1に示した通りである。

3.3 性能関数

床版に生じる最大作用曲げモーメント M_u が終局抵抗

曲げモーメント M_{cr} を上回る場合に破壊が生じるとみなせば、性能関数 Z は式(1)で与えられる。

$$Z = A_s \times d \times X(2) - \frac{0.5 \times A_s^2}{0.85 \times b} \times \frac{X(2)^2}{X(1)} - \{M_d \times 10^6 + i \times X(3)\} \quad (1)$$

式中、 A_s ：鉄筋量、 d ：有効高さ、 b ：断面幅（単位幅）、 M_d ：死荷重による曲げモーメント、 i ：衝撃係数で、 $X(1), X(2), X(3)$ は表-1の通りである。

4. 信頼性指標の算定結果

表-3 および表-4 および図-1 に算定結果を示す。紙面の都合上、鉄筋の腐食環境が最も厳しい case1 と最も穏やかな環境である case9 の結果のみを示す。

表-3 case1 の算定結果

経過年	鉄筋量 (mm ²)	信頼性指標 β	破壊確率 Pf
0	3097	3.29	4.95E-04
20	2741	3.04	1.18E-03
40	2335	2.71	3.41E-03
60	1988	2.36	9.24E-03
80	1693	1.99	2.33E-02
100	1442	1.6	5.47E-02

表-4 case9 の算定結果

経過年	鉄筋量 (mm ²)	信頼性指標 β	破壊確率 Pf
0	3097	3.29	4.95E-04
20	3097	3.29	4.95E-04
40	3097	3.29	4.95E-04
60	2889	3.15	8.22E-04
80	2666	2.98	1.42E-03
100	2461	2.82	2.43E-03

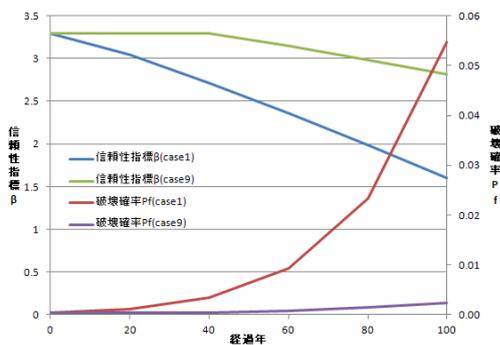


図-1 信頼性の経時変化

図-1 に示した破壊確率の経時変化を見れば、かぶりが 4cm で橋梁の所在位置が飛沫帯である場合 (case1), 指数関数的に破壊確率が大きくなっていることが理解できる。参考文献 7) によれば、ISO 基準においては終局限界状態に対する目標信頼性指標は 4.3 (重要度の高い場合) および 2.3 (重要度の低い場合) であり、その点からは今回の解析モデルの安全性は、厳しい環境下でも少なくとも 50 年程度までの本橋の信頼性は終局限界状態に対してもかなり高いと判断できる。

一方、かぶりが 6cm で所在位置が沿岸より 500m 離れている場合 (case9) の終局限界状態に対する危険度は、設

計耐用期間内で小さいと判断ができる。

5. まとめ

本研究では、RC 構造物の信頼性設計を視野に入れて、許容応力度設計法をベースとした旧道路橋設計仕方書で設計された RC 床版橋の終局限界状態に対する構造信頼度に対する試算を試みた。

支間長、幅員、断面寸法などの幾何学的諸量や死荷重、かぶりの不確実性や、解析や施工の誤差については無視しているものの、破壊確率にもっとも大きく影響すると思われる材料強度や活荷重の不確実性を考慮した信頼性解析の結果、厳しい劣化環境下でも、解析モデル橋の信頼性指標は、橋梁の重要度が低い場合の ISO にある目標信頼性指標を 60 年程度は下まわらない結果が得られた。

ただ、わが国では、橋齢と目標信頼性との関係についての議論は極めて乏しいと言わざるを得ず、この点については今後の大きな課題であると考えている。

また、今回は RC 床版の劣化を塩害のみとしたが、疲労も重要な劣化要因であるから、このことを考慮した信頼性解析や、将来的には信頼性指標の経時変化を考慮した RC 構造物の維持管理システムの構築が必要であると考えている。

最後に、本研究の実施に当たり、株式会社荒谷建設コンサルタント 岡本 晋氏にはいろいろとご教示いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007. 3.
- 2) L. A. Clark 著 / 関西道路研究会コンクリート橋専門委員会訳: 新しい英国基準 BS5400 によるコンクリート橋の設計, 国民科学社, 1984 年 7 月.
- 3) 大島俊之: 建設系アセットマネジメント補修事業計画の立て方と進め方, 森北出版, 2009. 10.
- 4) 前田幸雄他: 限界状態設計法による合成桁橋の荷重係数について, 合成構造の活用に関するシンポジウム公演論文集, 1986. 9.
- 5) 宮本文穂, 森川英典, 石田宗弘: 統計データに基づく不確実性を考慮した既存コンクリート橋の安全性評価, 土木学会論文集, No. 472/V-20, pp. 49-58, 1993. 8.
- 6) 森川英典, 森田祐介, 小島大祐: 不確実性を考慮した塩害劣化および安全性の評価, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 1, pp. 145-158, 2006. 2.
- 7) 森川英典, 岡本早夏: 塩害劣化による安全性が低下した RC 橋における最強補強, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 1, pp. 186-201, 2006. 2.
- 8) 村越潤: 鋼 I 桁橋の信頼性指標 β の評価と部分係数に関する基礎検討, 構造工学論文集 Vol. 53A, 2007. 3.
- 9) 星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986. 5. 30.
- 10) 鉄筋コンクリート床版橋(上部工)の設計計算書, 川田テクノシステム.
- 11) 松井繁之: 道路橋床版 - 設計・施工と維持管理 -, 2007. 10.
- 12) (社)土木学会: 平成 11 年度版コンクリート標準示方書[施工編]-耐久照査型-, 2001. 1.